

L'émergence cosmique des disques galactiques^{*}

L'ordre à partir du chaos

Christophe Pichon
Institut Astrophysique de Paris
Collaboration Horizon
Korean Institute of advanced Studies

Compte rendu rédigé par Jean Pierre Treuil, Abdel Kenoufi, Michel Gondran
Académie Européenne Interdisciplinaires des Sciences

23 février 2024

1 Un rappel

Dès le point final mis par E. Hubble au "Grand Débat" sur la nature de certaines nébuleuses, devenues "nébuleuses extragalactiques" puis galaxies, les chercheurs se sont intéressés aux diverses formes de ces objets et leurs transformations. Ainsi, en 1926, puis en 1936 (*The Realm of the Nebulae*), Hubble publiait un diagramme en "diapason", avec un manche constitué de galaxies dites "elliptiques", d'excentricité croissante et deux branches de galaxies spirales. Il pensait alors que cette séquence correspondait à un ordre chronologique d'évolution, les elliptiques se transformant peu à peu en spirales. Les premières ont ainsi été qualifiées de "précoces" et les secondes de "tardives". Mais ce vocabulaire a abandonné sa signification chronologique et n'est plus qu'un schéma de classification encore utilisé aujourd'hui. De fait, c'est plutôt l'évolution inverse qui semble avoir l'avantage à l'heure actuelle, les spirales apparaissant les premières dans l'histoire de l'univers.

De fait, les dynamiques concernées sont beaucoup plus complexes qu'on l'imaginait au départ, et Christophe Pichon (CP ci après) va traiter de questions constituant actuellement un thème de recherche actif : dans quels environnements naissent les galaxies, quels sont les processus en oeuvre dans ces naissances et dans la genèse des formes initiales, quels sont les poids respectifs de ces divers processus, qu'est ce qui explique la prévalence initiale des galaxies spirales; quelles migrations et transformations effectuent-elles ensuite, peut-il y avoir pour ces transformations des "retours en arrière", existe-t-il des mécanismes de stabilisation morphologique; quelles sont les caractéristiques mécaniques et physiques se modifiant au cours de ces transformations et comment ?

2 Les disques galactiques, incongrus dans un univers chaotique ?

Au début de sa conférence, CP évoque l'intérêt qu'il porte depuis longtemps à la notion d'émergence, notoirement pluridisciplinaire; émergence comme "apparition de structures nouvelles et cohérentes, par auto-organisation dans des systèmes complexes". Contrôlées par des lois simples - essentiellement celles de la gravitation - la genèse et l'évolution des disques galactiques, dans un univers en expansion et au sein d'un environnement complexe et chaotique lui paraissent en effet relever d'une telle notion, bien que curieusement cette dernière soit peu

^{*}Conférence de C. Pichon faite le 5 février 2024 lors de la séance mensuelle de l'AEIS du même jour

utilisée en astrophysique. Toujours en préambule, CP mobilise un exemple très parlant pour nous faire comprendre ce qu'est un système ouvert et dissipatif, recevant de son environnement de l'énergie libre dont une partie, sous forme de travail, donne au système une forme ordonnée, la maintient voire la renforce.

Après ce préambule, CP nous donne plusieurs exemples de disques galactiques, à commencer par notre galaxie, vue par le satellite Gaïa et d'autres instruments. Il présente également des images de galaxies en train de fusionner, avec les modifications morphologiques qui accompagnent ces événements majeurs et fréquents à l'échelle de la vie de ces objets, et des exemples de résidus de fusions. CP rappelle aussi le comportement cinétique de différents fluides : (pseudo) fluides d'étoiles, fluides de matière noire (sans collisions), fluides de gaz (avec collision).

Puis il pose la question : alors que ces disques galactiques paraissent fragiles, incongrus dans cet univers chaotique, comment se fait-il qu'ils soient majoritaires, "omniprésents" au sein de cette zoologie. Comment se fait-il qu'une galaxie reste sous forme d'un disque très aplati, alors qu'elle est constamment affectée par des événements très énergétiques¹. Il prépare la réponse en étendant le champ de vision, depuis l'environnement galactique immédiat - où l'on aperçoit la trace des courants de gaz alimentant un disque galactique, jusqu'aux grandes échelles de la toile cosmique, avec ses vides, ses filaments et ses noeuds, et où la distribution spatiale des galaxies est tout sauf aléatoire². Ces images suggèrent que la relative permanence du réseau filamentaire de gaz froids alimentant les galaxies soit déterminante quant aux lieux où naissent puis migrent ces dernières et quant à la direction et l'intensité de leurs moments angulaires ; et qu'en retour les galaxies puissent à plus court terme, dans leur environnement proche, interagir avec les extrémités de ces filaments pour ajuster les flux rentrants. Le cadre des thèses qu'il va développer est maintenant en place.

3 Genèse et Résilience des disques galactiques

CP en vient donc à nous présenter, sous un mode pédagogique faisant appel à nombre d'analogies avec "la vie courante", les idées qu'il défend avec de nombreux collaborateurs³ et qui ont fait l'objet de nombreuses publications dans les décades 2000, 2010, 2020. Publications qui exploitent notamment les résultats de *simulations* (MareNostrum, collaboration Horizon, NewHorizon) : simulations couplant la dynamique de la matière noire et la formation et l'évolution de la toile cosmique, la dynamique des gaz, la formation des galaxies. Donc des simulations s'étendant spatialement sur plusieurs dizaines de mégaparsecs avec des résolutions descendant jusqu'à quelques dizaines de parsecs. Ces idées associent deux mécanismes, apparition/mise en place des disques et maintenance/résilience. Le coeur de ces idées réside ainsi,

1. apparition/mise en place : dans le rôle donné à la toile cosmique et à sa relative permanence, plus précisément à l'anisotropie des directions des filaments se rencontrant en un noeud donné, et à la cinétique de la matière noire et des courants de gaz froids circulant autour et dans ces filaments ; structure de la toile et cinétique des courants déterminant la genèse de disques galactiques très aplatis et imprimant sur ces disques des vitesses de rotation angulaires stratifiées⁴

1. Comme le rappelle dans l'introduction d'une publication (De Rijcke 2019) un collaborateur de CP : *The causes and the life expectancy of spiral structures of galaxies are still uncertain.*

2. Dans l'univers, les galaxies sont en effet principalement réparties le long de filaments de gaz très ténus - cf observations de l'instrument MUSE du VLT dans l'univers jeune - et dans leurs jonctions. Filaments longs de millions d'années-lumière, entre lesquels règnent des vides, et qui forment la toile cosmique.

3. Citons notamment Charlotte Welker, Yohan Dubois, Julien Devriendt, Sandrine Codis, Dmitri Pogosyan, Sven de Rijcke...

4. Pour reprendre une des diapositives de CP : Les disques se (re)forment parce que les grandes structures sont jeunes dynamiquement et anisotropes. Elles induisent une advection de gaz froid le long des filaments, qui se stratifie pour (re) construire continuellement les disques.

2. maintenance/résilience : dans la proposition de mécanismes stabilisant les formes et cinétiques acquises en compensant certains des événements perturbateurs externes (fusions mineures, passages à proximité, accrétions) ou internes (explosions de supernovae, turbulences diverses...).

Concernant la genèse, CP rappelle plusieurs faits : 1) la structure stratifiée d'un disque galactique, dont les anneaux externes tournent angulairement plus vite que les anneaux proches du centre; 2) le fait que la toile cosmique, sous-tendue par la matière noire, évolue certes au cours du temps; mais le temps dynamique⁵, pour une échelle donnée, est inversement proportionnel à la racine carré de la densité mesurée à cette échelle. A grande échelle il ne se passe pas grand chose. C'est au voisinage et à l'échelle des connexions entre filaments, où la densité est plus forte, que l'évolution est plus rapide. Des images à différentes échelles, issues de simulations et superposant des états de la toile prise sur une succession d'époques montrent bien ces différences de rythmes; 3) le comportement "collisionnaire" des flux de gaz, lorsqu'ils se rencontrent sur les filaments, fait que ces flux vont se concentrer sur ces derniers en reproduisant la toile cosmique mais de façon plus contrastée.

Concernant la résilience, CP avance l'existence d'une *boucle de rétroaction* ayant pour origine les marées provoquées par l'induction momentanée d'un potentiel gravitationnel lié à un événement perturbateur. L'étude de la réaction à une telle perturbation gravitationnelle d'un disque auto-gravitant et déjà structuré en un ensemble stationnaire d'orbites circulaires - un disque "froid" - avait déjà été menée dans les années 1975/1980⁶. Cette réaction consiste d'abord dans une *amplification* : la masse des corps concernés par la marée dans le disque est plus de cent fois supérieure à la masse en jeu dans l'événement perturbateur. Amplification liée aux corrélations à longue portée liant les modifications orbitales potentielles des objets du disque. Elle consiste aussi en un renforcement de la "rigidité" du disque, son côté "froid", caractérisé par des corrélations encore plus longues et une capacité de réaction aux événements futurs encore plus rapide. Formellement, cette boucle de rétroaction mobilise un *paramètre de stabilité marginale* Q . Elle alterne les phases de stabilisation (Q décroissant) et de déstabilisation (Q croissant) avec un bilan amenant (sauf perturbation majeure, comme par exemple la fusion avec une galaxie de masse équivalente) la galaxie dans un état de *stabilité marginale*.

Mais les termes de rigidité et de stabilité sont trompeurs pour saisir l'état de ces disques ainsi "refroidis". Il s'agit plutôt d'une situation *au bord de l'instabilité*, mais que la rapidité des rétroactions parvient à maintenir. CP utilise l'image très parlante d'une bicyclette descendant une pente et qui reste "sur pied", et ce d'autant plus fermement qu'elle va plus vite. Il évoque aussi la mécanique du gyroscope. Techniquement la dynamique instantanée du système est décrite par une équation de réaction-diffusion, combinant⁷ "refroidissement" (stabilisation des orbites) et chauffage (diffusion des perturbations orbitales.); mais une équation dont les coefficients - du refroidissement et du chauffage - croissent parallèlement avec la succession des boucles de rétroaction, processus renforçant la minceur du disque et assurant sa résilience de plus en plus prononcée aux perturbations.

Pour parler de ces processus et de leurs résultats, CP avance des termes comme temps dynamique, auto-régulation, auto-catalyse (de la part "froide" du disque galactique), robustesse (insensibilité relative à certaines variations de paramètres ou d'environnement), système ouvert et dissipatif (un ordre de plus en plus marqué, et l'entropie s'évacuant par rayonnement), de criticalité auto-organisée, d'homéostasie, d'émergence. Tous termes utilisés dans d'autres domaines scientifiques, et notamment en biologie. Ce qui conduit CP, dans une de ses diapo-

5. peut être compris intuitivement comme le temps nécessaire pour une transformation significative d'un système. Ainsi dira-t-on que la toile cosmique est "jeune" dynamiquement, car elle ne s'est que peu transformée, à une certaine échelle, au cours de l'histoire de l'univers.

6. Alar Toomre, 1981, cité par CP.

7. sous forme d'un terme logistique, quand tout est "froid", i.e. que toutes les orbites stellaires sont circulaires, il est clair que aucun refroidissement (diminution de l'excentricité) ne peut plus s'opérer.

sitives complémentaires, de poser la question : "Is a disk alive?" ou plus plus précisément, Un disque galactique est-il un système "pré-biotique"?

4 Discussions

Des questions ont été posées pendant l'exposé lui même et à son issue.

Pendant l'exposé. Une première question a été sur l'interprétation de la séquence de Hubble, avec comme réponse l'obsolescence de son statut chronologique. Une seconde question rappelle l'omniprésence des disques planétaires, tels que celui hébergeant notre terre : implicitement, la forme de disque n'est elle pas la forme "normale" des objets auto-gravitants, dès lors qu'un moment angulaire leur est donné au départ? CP développera sa réponse en fin d'exposé. Une autre question a concerné l'hypothèse de la matière noire et son caractère "ad-hoc", alors que sa structuration dans la toile cosmique joue un rôle majeure. Il existe des hypothèses alternatives, CP rappelle à cette occasion qu'il s'agit d'un thème de recherche actif.

A l'issue de l'exposé. L'une des remarques de CP, reliant pour résumer l'émergence des disques galactiques à l'action de la gravité à toutes les échelles, amène la question de la difficulté de construire une théorie du "Grand Tout", de la grande unification. CP répond que la gravité n'est pas tout à fait le seul acteur, il a besoin de la dissipation. Si l'on arrête l'arrivée des gaz, le désordre va s'installer. Il mentionne cependant une exception apparente à cette croissance de l'entropie, dans la formation spontanée de barres centrales (un ordre local) dans des galaxies produisant peu d'étoiles conjointe à une redistribution des étoiles à la périphérie. A une question sur la stabilité de la toile cosmique au cours du temps, CP rappelle sa dépendance par rapport à l'échelle du regard. La structure filamentaire existe à toutes les échelles, mais "les horloges ne sont pas les mêmes" et à petites échelles, par exemple dans l'environnement d'une galaxie, les choses changent plus vite. CP évoque à ce propos un point d'histoire récente de sa discipline : dans les années 1980, les travaux sur les modèles d'effondrement se focalisaient sur des objets isolés et/ou dans un environnement isotrope et stable. Or c'est une situation qui n'existe pas dans la nature : l'objet *et* son environnement *co-évoluent*, les couplages d'échelle sont omniprésents. Les ordinateurs ont permis de les simuler efficacement.

Mais pourquoi les étoiles ne sont pas des disques, et pourquoi les galaxies ne sont pas t-elles des sphères. CP invoque à nouveau les différences de temps dynamique : les étoiles sont de vieux objets, les nuages de gaz qui en sont l'origine sont des milieux collisionnels, source de viscosité, ces objets de longue vie ont eu le temps de redistribuer leur moment angulaire. Les galaxies, des "gaz d'étoiles" mais sans collision, des objets "jeunes", n'ayant effectuée qu'un petit nombre de rotations depuis leur naissance, ne sont pas dans une situation comparable. Une question concerne la manière dont est compensé l'ordre local s'établissant dans la galaxie : par exemple un désordre accru dans la structure filamentaire proche. CP rappelle : c'est le rayonnement isotrope dont l'énergie est issue des chocs dans les gaz qui disperse l'entropie. Une remarque concerne la similitude frappante des images de notre galaxie en infra-rouge et en ondes gamma. CP rappelle que les mêmes processus physiques peuvent émettre sur plusieurs longueurs d'ondes. Il souligne à cette occasion l'élargissement considérable de notre perception de l'univers, en comparaison de ce qu'elle était il y a un siècle : sur les fréquences (des ondes radio aux rayons gamma), sur l'étendue accessible simultanément (Euclid), sur la profondeur (James Webb). Une dernière intervention revient sur certaines invariances d'échelle et le fait que s'établissent dans les galaxies des corrélations à longue portée. Cela évoque le groupe de renormalisation, les points critiques de transitions de phase, des fluctuations en lois de puissances, des corrélations infinies et des structures fractales : de telles structures apparaissent elles dans les observations ou les simulations? CP répond que, sur la distribution des galaxies, on pensait dans les années 1990 qu'il pouvait en être ainsi. Cette hypothèse (d'invariance d'échelle liée à une transition de phase) a été abandonnée suite aux analyses des spectres de puissance. De même pour les disques, bien que ce ne soit pas encore une question bien explorée.